Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 14, No. 4, Oct- Nov 2018, p.585-600

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 4، مهر- آبان 1397، ص. 600-585

# بهینه‌سازی تولید پودر پوره سیب‌زمینی به روش خشک کردن کف‌پوشی

عاطفه پورمهدی[1]- محبّت محبّی[2]*- اشرف گوهری اردبیلی[3]- مهدی وریدی[4]- محمّدرضا صلاحی[5]

تاریخ دریافت: 1395/09/23
تاریخ پذیرش: 1396/10/19

## چکیده

خشک کردن کف‌پوشی روشی است که در آن امکان خشک کردن ماده غذایی در دما و مدت زمان کمتر وجود دارد. در این پژوهش، تولید پودر پوره سیب‌زمینی با استفاده از تکنیک خشک کردن کف‌پوشی مورد مطالعه قرار گرفت. شرایط تولید کف بهینه پوره سیب‌زمینی از نظر نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید (2:1-1:1 وزنی- وزنی)، غلظت صمغ عربی (0/9–0/1 درصد) به‌عنوان پایدارکننده کف و زمان همزدن (9-3 دقیقه) جهت ایجاد کف با کمترین مقدار دانسیته و بیشترین پایداری با استفاده از تکنیک سطح پاسخ تعیین شد. جهت ارزیابی رفتار خشک شدن کف بهینه شده، عمل خشک کردن در 3 دمای 45، 60 و 80 درجه سانتی‌گراد و در ضخامت 3 میلی‌متر انجام شد. 10 مدل برای بررسی کینتیک خشک شدن کف بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت. آنالیزهای آماری نشان داد که در تمامی فرایندهای خشک کردن مدل ویبل بهترین انطباق را با داده‌های تجربی داشت. مقادیر ضریب نفوذ موثر محاسبه شده با استفاده از قانون دوم فیک در بازه دمایی مورد مطالعه در محدوده $3/286\times10^{-9}$ تا $8/032\times10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه با میزان انرژی فعّال‌سازی 30/97 کیلوژول بر مول قرار داشت. به‌علاوه پودرها از نظر فعّالیت آبی و قابلیت جذب رطوبت مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فعّالیت آبی پودرهای تولید شده با افزایش دما کاهش پیدا کرد. همچنین، دمای خشک کردن اثر معنی‌داری بر قابلیت جذب رطوبت پودرها نداشت.

**واژه‌های کلیدی:** پوره سیب‌زمینی، خشک کردن کف‌پوشی، بهینه‌سازی، خواص کف، ضریب نفوذ موثرآب، مدل‌سازی

## مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی سولانوم توبروزوم (*Solanum Tuberosum*) متعلق به تیره *Solanacea* و دارای انواع دیپلوئید، تریپلوئید، تتراپلوئید، پنتاپلوئید و هگزاپلوئید می‌باشد (Hooker, 1983). سیب‌زمینی از عمده‌ترین و مهم‌ترین اقلام غذایی در تغذیه انسان به‌شمار می‌رود. بسیاری از دانشمندان سیب‌زمینی را به‌عنوان مهمترین ماده غذایی جهت رفع گرسنگی در جهان دانسته و توسعه بیشتر این محصول را در کشورهای در حال توسعه پیشنهاد می‌کنند. این محصول با تولید سالانه بیش از 300 میلیون تن، در جهان از نظر اهمیت غذایی مقام پنجم را بعد از گندمیان (گندم، برنج، ذرت و جو) دارد (Duran *et al.*, 2007). براساس آمار ارائه شده توسط فائو، مقدار تولید سیب‌زمینی در ایران در سال 2011، 4/5 میلیون تن بوده که از این نظر در رتبه چهاردهم دنیا قرار دارد (Anouymous, 2011). غده‌های تازه سیب‌زمینی دارای 75 تا 80 درصد آب و حدود 20 درصد ماده خشک هستند. ماده خشک سیب‌زمینی شامل 60 درصد نشاسته، 1 درصد املاح معدنی، 5 درصد مواد فیبری و 2 درصد مواد پروتئینی می‌باشد. نشاسته سیب‌زمینی از 25-20 درصد آمیلوز و80-75 درصد آمیلوپکتین تشکیل شده است. سیب‌زمینی شامل انواع ویتامین‌های محلول در آب و چربی مانند ویتامین‌های گروه B ($B_1$, $B_2$, $B_6$, $B_{12}$)، ویتامین‌های A و C و عناصر معدنی از جمله پتاسیم، سدیم، کلسیم، کلر و منیزیم است (جعفریان،2000؛ Lisinska & Leszczynski, 1989).

فرآوری سیب‌زمینی می‌تواند تا حدود زیادی خسارت ناشی از انبارداری نامناسب را کاهش داد. یکی از روش‌های افزایش عمر ماندگاری فراورده‌های کشاورزی خشک کردن است. در حال حاضر بخش عمده‌ای از محصولات کشاورزی به شیوه سنتی و با کیفیتی پایین خشک می‌شوند. در روش‌های سنتی خشک کردن از دما و یا زمان طولانی استفاده می‌شود که این امر علاوه بر مصرف زیاد انرژی

---

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات مازندران
2، 4، 5- به‌ترتیب استاد، استادیار و دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد.
3- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان.
(*مسئول مکاتبات: Email: mohebbatm@gmail.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v14i4.60995

و زمانبر بودن فرایند، سبب بروز تغییرات فیزیکی و شیمیایی نامطلوب نظیر تغییرات رنگ، عطر، طعم و کاهش مواد مغذی و چروکیدگی در محصول می‌شود. بنابراین استفاده از دیگر روش‌های خشک کردن همراه با پیش تیمارهای مختلف می‌تواند کیفیت مواد غذایی را به نحو مطلوبی حفظ نماید. دما و زمان فرایند خشک کردن از مهمترین عواملی هستند که بر ویژگی‌های محصول نهایی اثر می‌گذارند. ویژگی‌های ذرات خشک شده نظیر ساختار، میزان تخلخل، دانسیته و اندازه ذرات در حلالیت مجدد آن در آب نقش مهمی را ایفا می‌کنند (صلاحی، 1394). خشک کردن کف‌پوشی روشی است که در آن امکان خشک کردن ماده غذایی در دما و مدت زمان کمتر وجود دارد. به دلیل ساختار متخلخل ترکیبات در حالت کفی انتقال جرم تسهیل می‌گردد که منجر به کاهش زمان خشک شدن و در نتیجه کیفیت بهتر محصول می‌شود (Brygidyr *et al*., 1977). در این روش مواد غذایی مایع و شبه‌مایع با افزودن ترکیبات کف‌زا و پایدارکننده و وارد کردن هوا توسط همزدن به شکل کف پایدار درآمده، با استفاده از هوای گرم در فشار اتمسفری خشک شده و به شکل ورقه نازک متخلخل (Mat) در می‌آیند. از جمله مزایای این روش می‌توان به سادگی، هزینه پایین، امکان خشک کردن نسبتاً سریع در دمای پایین و مناسب بودن برای خشک کردن مواد غذایی حساس به حرارت اشاره کرد. همچنین، به دلیل ساختار متخلخل پودرهای حاصل، امکان جذب سریع آب و کیفیت بازسازی بالا وجود دارد (Kadam *et al*., 2010). انتقال حرارت در کف نسبت به مایعات کارایی کمتری دارد، اما با این وجود علت افزایش سرعت خشک کردن در این حالت افزایش سطح تماس و انتقال ساده‌تر رطوبت از ساختار کف نسبت به مواد غذایی مایع است (صلاحی، 1394). خشک کردن کف‌پوشی برای محصولات گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: آب سیب (Raharitsifa *et al*., 2006)، انبه (Rajkumar *et al*., 2007)، موز (Thuwapanichayanan *et al*., 2008)، آب گوجه (Kadam & Balasubramanuan, 2011)، قارچ دکمه‌ای (پاسبان، 1391)، میگو (عزیزپور، 1391)، ریز جلبک اسپیرولینا (عطاردی،1393)، ماهی کیلکا (حسنزاده راد، 1393)، پنیر (ایزدی، 1393) و پالپ طالبی (صلاحی، 1394).

پودر سیب‌زمینی قابلیت کاربرد در فرمولاسیون مواد غذایی نظیر صنایع شیرینی‌پزی، بهبود خواص محصولات نظیر طعم، حجم، عطر و کیفیت ماندگاری و نیز به‌عنوان یک جزء اصلی در ماکارونی، سوپ‌های آماده، سس‌ها، دسر، فرنی و فراورده‌های مشابه را دارد.

هدف از این پژوهش بهینه‌سازی شرایط تولید کف پوره سیب‌زمینی با استفاده از تکنیک سطح پاسخ، بررسی رفتار خشک شدن کف بهینه شده با ارزیابی کینتیک و سرعت خشک شدن، مدل‌سازی و محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت در دماهای مختلف و ارزیابی خواص فیزیکوشیمیایی پودرهای تولیدی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل سیب‌زمینی (واریته *Agria*) و صمغ عربی (سیگما، آمریکا) بودند. سی زمینی از سطح شهر مشهد تهیه شد. سیب‌زمینی‌های خریداری شده تا زمان انجام آزمون در مکانی تاریک با دمای مناسب نگهداری شدند.

### آماده‌سازی محلول صمغ عربی

بر اساس پیش تیمارهای انجام گرفته، محلول های صمغ با اضافه کردن مقادیر لازم از پودر صمغ عربی به‌صورت وزنی- وزنی به آب مقطر و مخلوط کردن توسط همزن مغناطیسی جهت ایجاد غلظت‌های 0/1، 0/5 و 0/9 درصد در نمونه‌های کف تهیه شدند. پس از آن محلول صمغ به مدت 24 -18 ساعت جهت انجام هیدراسیون کامل مولکول‌های صمغ در دمای یخچال (4 درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد. جهت ممانعت از خروج رطوبت، درب ظروف حاوی محلول صمغ به‌طور کامل توسط فویل آلومینیوم پوشانده شد.

### آماده‌سازی پوره سیب‌زمینی

ابتدا سیب‌زمینی‌ها به‌طور کامل شست‌وشو داده شدند. سپس توسط چاقوی استیل پوست‌گیری شده و مجدداً شسته شدند و آب اضافی آنها توسط دستمال به‌طور کامل گرفته شد. در ادامه، سیب زمینی‌ها رنده شده و به قطعات ریزی تبدیل شدند. در نهایت، این قطعات ریز توسط خردکن خانگی (فیلیپس، 600 وات) با حداکثر دور (1200 دور در دقیقه) به مدت 3 دقیقه همزده شدند تا پوره همگنی حاصل شود.

### آماده سازی نمونه‌های کف

طبق طرح آزمایشی مرکب مرکزی متمرکز شده[1] (FCCD)، پوره سیب‌زمینی در نسبت‌های 1:1، 1: 1/5 و 2:1 (وزنی/ وزنی) با محلول هیدروکلوئید که در روز قبل آماده‌سازی شده بود درون یک بشر مخلوط شد. مبنای تهیه مخلوط پوره سیب‌زمینی و محلول صمغ برای کل آزمایشات 100 گرم بود. محلول هیدروکلوئید 30 دقیقه قبل از انجام آزمون، به‌منظور رسیدن به دمای محیط، از یخچال بیرون آورده می‌شد. مخلوط مورد نظر با همزن دستی (Sunny, SM 88، چین) با بیشترین سرعت (1500 rpm) در دمای محیط برای زمان‌های تعیین شده بر اساس طرح مرکب مرکزی همزده شد. پس از اتمام زمان هم زدن، بلافاصله خصوصیات کف مورد بررسی قرار گرفت.

1 Face-Centered Central Composite Design

## ارزیابی ویژگی‌های کف

### دانسیته کف

به‌منظور تعیین دانسیته کف[1] (FD)، وزن 50 میلی‌لیتر از نمونه کف با استفاده از استوانه مدرج در دمای محیط تعیین شد (Bag *et al.*, 2011). به‌منظور جلوگیری از تخریب ساختار کف و نیز ممانعت از ایجاد حفره هوا درون استوانه مدرج، انتقال کف به درون استوانه با دقت انجام شد. دانسیته کف پوره سیب‌زمینی به‌صورت جرم واحد حجم ($g/cm^3$) بیان شد.

### پایداری کف

اندازه‌گیری پایداری کف مهمترین مرحله در ارزیابی سیستم‌های کفی می‌باشد. کف‌هایی که ساختار خود را حداقل برای یک ساعت بتوانند حفظ کنند از نظر مکانیکی و حرارتی برای فرایند خشک کردن پایدار محسوب می‌شوند (Ratti & Kudra, 2006). میزان مایع جدا شده از کف متداول‌ترین روش اندازه‌گیری پایداری کف می‌باشد. به‌منظور تعیین پایداری کف آزمون میزان مایع جدا شده (حجم زهکشی[2] (DV)) از کف مبتنی بر روش بیان شده توسط Bag و همکاران (2011) همراه با کمی تغییر مورد استفاده قرار گرفت. در روش اصلاح شده، 50 گرم از نمونه کف به درون قیف بوخنر با قطر 80 میلی‌متر که با صافی توری با مش 40 پوشانده شده بود و روی استوانه مدرج با حجم 25 میلی‌متر قرار داشت، ریخته شد. پس از گذشت یک ساعت، مقدار مایع جدا شده از نمونه کف در اثر نیروی جاذبه در دمای محیط که درون استوانه مدرج جمع شده بود به‌عنوان حجم زهکشی برحسب میلی‌لیتر بیان شد.

## خشک کردن کف بهینه و بررسی کینتیک خشک شدن با خشک‌کن هوای داغ

خشک کردن نمونه‌های کف بهینه شده توسط خشک‌کن غیرمداوم کابینتی با جریان هوای داغ و مجهز به سه سینی مشبک (طب سروش، مشهد) انجام گرفت. جریان هوای داغ در این خشک‌کن از قسمت مرکزی خشک کن و با سرعت ثابت 1/5 متر بر ثانیه بود. دقایقی قبل از شروع فرایند خشک کردن، دستگاه خشک‌کن روشن شده، روی دمای مورد نظر تنظیم می‌شد. دمای خشک‌کن با دقت 0/1± درجه سانتی‌گراد توسط ترموکوپل تعبیه شده در داخل دستگاه قابل تنظیم بود. نمونه‌های کف تولید شده در شرایط بهینه پس از آماده‌سازی در پلیت‌های آلومینیومی با قطر 95 میلی‌متر و ضخامت 7 میکرومتر به‌صورت لایه نازک با ضخامت 3 میلی‌متر ریخته شده و در دماهای 45، 60 و 80 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. در ادامه کف‌های خشک شده توسط آسیاب خانگی به پودر تبدیل شدند. پودرها بعد از عبور از صافی درون ظروف شیشه‌ای ریخته شده و پس از دربندی تا انجام آزمون‌ها در دمای یخچال نگهداری شدند.

برای ارزیابی کینتیک خشک شدن، همانند شرایط مرحله خشک کردن کف، پلیت‌های آلومینیومی حاوی نمونه‌های کف درون خشک‌کن با جریان هوای داغ قرار گرفتند. سپس در فواصل زمانی مشخص نمونه‌ها از خشک‌کن خارج و توسط ترازوی دیجیتال (AND.EK-300i، ژاپن) با دقت 0/01g± توزین شدند. این فرایند تا رسیدن به وزن ثابتی از نمونه‌ها ادامه پیدا کرد. همچنین، برای محاسبه سرعت خشک شدن[3] کف پوره سیب‌زمینی از معادله زیر استفاده شد:

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \qquad (1)$$

که در این رابطه، $M_{t+\Delta t}$ محتوای رطوبتی بر حسب ماده خشک در زمان $t+\Delta t$، $t$ زمان (دقیقه) و $\Delta t$ نشان‌دهنده اختلاف زمان می‌باشند.

## محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت

نفوذ رطوبت مهم ترین عامل کنترل‌کننده فرایند خشک کردن می‌باشد. هنگامی که مکانیسم‌های مختلفی در انتقال موثر باشند، بررسی هر مکانیسم و اندازه‌گیری میزان انتقال جرم در هر یک دشوار است. از این رو در چنین فرایندهایی از توصیف نفوذ موثر و برای بیان مفهوم آن از قانون فیک استفاده می‌شود. محاسبه ضریب نفوذ موثر با استفاده از قانون دوم فیک (معادله 2)، ابزاری جهت توصیف فرایند خشک کردن و مکانیسم‌های ممکن در انتقال رطوبت درون مواد غذایی می باشد.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\frac{\partial^2 M}{\partial L^2} \qquad (2)$$

که در این رابطه، M مقدار رطوبت بر حسب ماده خشک، $D_{eff}$ ضریب نفوذ موثر رطوبت ($m^2/s$)، L جهت انتقال رطوبت (مشخصه فضایی) و t زمان خشک کردن است. با حل معادله فیک توسط Crank (1975)، نفوذ رطوبت برای تیغه نامحدود را می‌توان با استفاده از معادله 3، محاسبه کرد:

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}exp\left(-\frac{(2n-1)^2\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \qquad (3)$$

که در این رابطه MR نسبت رطوبت، n عدد صحیح مثبت، t زمان خشک کردن (ثانیه)، $D_{eff}$ ضریب نفوذ موثر ($m^2/s$) و L ضخامت کف (m) می‌باشد. برای استفاده از این معادله، فرضیات معینی باید در نظر گرفته شوند ازجمله: رطوبت در ابتدا به‌طور یکنواخت

1 Foam density
2 Drainage volume
3 Drying rate

درون نمونه پخش شده است، تنها مکانیسم نفوذ در انتقال جرم موثر است، ضریب نفوذ ثابت است و از افت آن می‌توان صرف نظر کرد و محتوی رطوبت سطحی نمونه به طور آنی به دمای تعادلی با محیط اطراف می رسد.

مقدار پارامتر MR با استفاده از مقدار رطوبت اولیه ($M_i$) ، رطوبت تعادلی ($M_e$) و رطوبت در هر لحظه (M) طبق معادله 4، تعیین شد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (4)$$

در زمان‌های خشک شدن طولانی معادله 3 ساده شده، جملات در سری نامحدود سریعاً همگرا شده و با اولین جمله سری تقریب زده شده و به‌صورت لگاریتمی نوشته می‌شود (Lopez *et al*., 2000):

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

با رسم نمودار Ln(MR) در برابر زمان خشک شدن یک خط مستقیم با شیب K به‌دست می‌آید که از آن می‌توان برای محاسبه ضریب نفوذ موثر استفاده کرد:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

در این پژوهش فرض شده است که انتقال حرارت فقط در یک سطح صورت می‌گیرد.

## محاسبه انرژی فعّال‌سازی

میزان انرژی فعّال‌سازی حدی از انرژی است که مولکول‌های آب باید در مرحله انتقال در محصول طی خشک شدن از آن عبور نمایند. دما مهمترین عامل خارجی موثر بر ضریب نفوذ طی فرایند خشک کردن می‌باشد. وابستگی قابلیت نفوذ مؤثر رطوبت با دما، بر حسب معادله مشهور آرنیوس بیان می‌شود (Akpinar *et al*., 2003):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

که در آن Do فاکتور آرنیوس ($m^2/s$)، Ea انرژی فعال‌سازی برای نفوذ رطوبت (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازهای ایده‌آل (kJ/k.mol) و T دمای مطلق بر حسب کلوین (K) می‌باشد. با رسم LnDeff در برابر عکس دما، می‌توان انرژی فعّال‌سازی را تعیین نمود.

## برازش منحنی‌های خشک شدن و انتخاب مدل مناسب

هدف از فرایند مدل‌سازی، برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های تجربی پیشنهادی و انتخاب مناسب ترین مدل جهت بررسی روند تغییرات ماده غذایی طی فرایند خشک کردن، طراحی خشک‌کن‌های صنعتی مناسب و یا بهبود سیستم‌های مورد استفاده می‌باشد (صلاحی، 1394). در این پژوهش 10 مدل استاندارد خشک کردن که در جدول 1، ارائه شده با نسبت رطوبت‌های به‌دست آمده توسط نرم‌افزار Matlab 2007 برازش داده شده‌اند.

جهت انتخاب بهترین مدل برای فرایند خشک کردن فاکتورهای ضریب همبستگی ($R^2$)، مربع کای ($\chi^2$)، ریشه میانگین مربعات (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) مورد ارزیابی قرار گرفتند. بهترین مدل خشک کردن دارای حداکثر میزان ($R^2$) و حداقل میزان $\chi^2$، RMSE و SSE است (Akpinar, 2006). مقادیر این 4 پارامتر با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$R^2 = \frac{\sum_j^n (MR_{Exp,i} - MR_{pre})^2 - \sum_j^n (MR_{exP,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_j^n (MR_{Exp,i} - MR_{pre})^2} \quad (8)$$

$$\chi 2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (MR_{exp,i} - MR_{pre,I})^2}{N-n} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_j^n (MR_{exP,i} - MR_{pre,i})^2}{n}} \quad (10)$$

$$SSE = \frac{\sum_i^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \quad (۱۱)$$

در این روابط $MR_{i,exp}$ نسبت رطوبت در i امین اندازه‌گیری، $MR_{i,pre}$ نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و Z تعداد ضرایب ثابت به‌کار رفته در هر مدل می‌باشد.

## بررسی ویژگی‌های پودر پوره سیب زمینی

### فعالیت آبی ($a_w$)

برای اندازه‌گیری فعّالیت آبی از دستگاه $a_w$متر ( Rotronic Hygrolab 2، سوئیس) استفاده شد. برای این منظور مقداری از پودر در ظرف مخصوص دستگاه ریخته شد و پس از برقراری تعادل، میزان فعّالیت آبی در دمای 1± 25 درجه سانتی‌گراد ثبت شد.

### ظرفیت جذب آب

جهت تعیین ظرفیت جذب آب از روش تغییر یافته Dunkwal و همکاران (2007) استفاده شد. یک گرم نمونه پودر به 30 گرم آب مقطر در لوله سانتریفوژ 50 میلی‌لیتری که از قبل توزین شده بود، اضافه شد. لوله با استفاده از شیکر به مدت 4 دقیقه مخلوط گردید و به مدت 18 ساعت در دمای محیط قرار گرفت. سپس لوله‌ها در سانتریفیوژ (Sigma, 2-16KC, Germany) قرار داده شد و در سرعت g ×3400 به مدت 40 دقیقه سانتریفوژ شد. در نهایت، مایع شفاف بالای لوله به آهستگی خالی شد. قطرات آب چسپیده به لوله با احتیاط جدا گردید به‌طوری که کمترین مقدار آب ممکن در لوله باقی بماند سپس لوله دوباره توزین شد. درصد ظرفیت جذب آب با استفاده

از معادله 12 محاسبه شد. آزمایش‌ها در دو تکرار برای هر نمونه انجام شد.

$$Water\ binding\ capacity = \frac{A-B}{C} \times 100 \qquad (12)$$

که در این رابطه A مقدار آب اضافه شده به پودر قبل از سانتریفوژ (گرم)، B مقدار آب برداشته شده بعد از سانتریفوژ (گرم)، و C وزن نمونه پودر (گرم) می باشد.

**جدول 1- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای ارزیابی کینتیک خشک شدن**

| ردیف | نام مدل | مدل |
|---|---|---|
| ۱ | نیوتن | $MR = \exp(-kt)$ |
| ۲ | پیچ اصلاح شده II | $MR = \exp(-c(t/l\text{^}2)\text{^}n)$ |
| ۳ | هندرسون و پابیس اصلاح شده | $MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$ |
| ٤ | دو جمله‌ای | $MR = a\exp(-bt) + c\exp(-dt)$ |
| ٥ | لگاریتمی | $MR = a\exp(-kt) + c$ |
| ٦ | تقریب انتشار | $MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$ |
| ۷ | معادله ساده شده انتشار فیک | $MR = a\exp(-c(t/L^2))$ |
| ۸ | جنا و داس | $MR = a\exp(-kt + b\sqrt{t}) + c$ |
| ۹ | لجستیک | $MR = a\ /\ (1+b)\exp(kt)$ |
| ۱۰ | توزیع ویبل | $MR = a - b\exp(-kt^n)$ |

### تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

طراحی آزمایش، آنالیز نتایج و تعیین شرایط بهینه تولید کف با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Expert Design نسخه 6.0.2 انجام گرفت. در این پژوهش، از طرح مرکب مرکزی متمرکز شده با سه متغیّر مستقل در سه سطح و شش تکرار در نقطه مرکزی طرح استفاده گردید به‌طوری که مجموع کل تیمارها 20 عدد بود. متغیّرهای مستقل شامل نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید، غلظت صمغ عربی و زمان همزدن بود. همچنین متغیّرهای وابسته (پاسخ) شامل دانسیته کف (بیان‌کننده قابلیت کف‌زایی) و حجم زهکشی (نشان‌دهنده پایداری کف) بودند. این طرح آزمایشی شامل سه سطح فاکتور کدبندی بود (1- ، 0، 1+) به‌طوری که سطح پائین هر فاکتور به‌عنوان کمینه و به‌صورت 1-، سطح میانی هر فاکتور با صفر و سطح بالای هر فاکتور به‌عنوان بیشینه و به‌صورت 1+ مشخص شد. محدوده آزمایش‌ها بر پایه نتایج به‌دست آمده از پیش تیمارها انتخاب شد که بر این اساس نسبت اختلاط پوره- محلول هیدروکلوئید 2:1–1:1، صمغ عربی 0/9- 0/1 درصد و زمان همزدن 9-3 دقیقه تعیین شدند (جدول 2).

کیفیت و صحت مدل رگرسیونی و مناسب بودن برازش صورت گرفته به‌وسیله پارامترهایی نظیر آنالیز مدل، ضعف برازش، و ضریب تعیین مشخص می‌شود (Kaur *et al*., 2009).

ویژگی‌های پودر تولید شده در قالب طرح کاملاً تصادفی در 3 تیمار و 2 تکرار مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز واریانس و رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16 انجام شد و از آزمون دانکن برای مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال 95 درصد استفاده شد($p$<0/05).

**جدول 2- سطوح متغیّرهای مستقل به همراه کدهای آنها**

| متغیّرهای مستقل | نماد | کد و سطوح مربوطه -1 | 0 | +1 |
|---|---|---|---|---|
| نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید (w/w) | $X_1$ | 1:1 | 1/5 :1 | 2:1 |
| صمغ عربی (g/100 g) | $X_2$ | 0/1 | 0/5 | 0/9 |
| زمان همزدن (دقیقه) | $X_3$ | 3 | 6 | 9 |

## نتایج و بحث

### تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به کف

### انتخاب مدل مناسب برای پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

نتایج به‌دست آمده از طرح آزمایشی مورد استفاده به‌منظور بهینه‌سازی شرایط تولید کف سیب‌زمینی در جدول 3، ارائه شده است.

به‌منظور تعیین و بررسی روند تغییر متغیّرهای پاسخ با متغیّرهای مستقل و پیش‌بینی هریک از پاسخ‌ها یعنی دانسیته و پایداری کف، مدل‌های مختلفی بر داده‌های حاصل از آزمون‌های طراحی شده برازش داده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آنالیز واریانس، مدل چند جمله‌ای درجه دوم به‌عنوان بهترین مدل برای بررسی اثر متغیّرهای مستقل بر خصوصیات دانسیته و پایداری کف پیشنهاد گردید. خلاصه نتایج تجزیه مدل‌ها جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل برای پاسخ‌های اندازه‌گیری شده در جدول 4، ارائه شده است.

جدول 3- نتایج طرح آزمایشی مورد استفاده به منظور بهینه سازی شرایط تولید کف پوره سیب زمینی

| ردیف | متغیّرهای مستقل | | | پاسخ‌ها | |
|---|---|---|---|---|---|
| | نسبت پوره به محلول هیدرکلوئید (w/w) | صمغ عربی (g/100g) | زمان همزدن (دقیقه) | دانسیته ($g/cm^3$) | حجم زهکشی (ml) |
| 1 | 1/5 (0) | 0/9 (+1) | 6 (0) | 0/53 | 10 |
| 2 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 9 (+1) | 0/40 | 12 |
| 3 | 1 (-1) | 0/9 (+1) | 3 (-1) | 0/60 | 9 |
| 4 | 1/5 (0) | 0/1 (-1) | 6 (0) | 0/39 | 21/5 |
| 5 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/45 | 14/5 |
| 6 | 2 (+1) | 0/9 (+1) | 3 (-1) | 0/39 | 7 |
| 7 | 1 (-1) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/44 | 11 |
| 8 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/46 | 13/5 |
| 9 | 1 (-1) | 0/9 (+1) | 9 (+1) | 0/69 | 8 |
| 10 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/40 | 11 |
| 11 | 2 (+1) | 0/9 (+1) | 9 (+1) | 0/38 | 5 |
| 12 | 2 (+1) | 0/1 (-1) | 3 (-1) | 0/48 | 20 |
| 13 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 3 (-1) | 0/49 | 16/15 |
| 14 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/45 | 16 |
| 15 | 2 (+1) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/27 | 7 |
| 16 | 2 (+1) | 0/1 (-1) | 9 (+1) | 0/44 | 20 |
| 17 | 1 (-1) | 0/1 (-1) | 3 (-1) | 0/42 | 18 |
| 18 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/46 | 14 |
| 19 | 1(-1) | 0/1 (-1) | 9 (+1) | 0/37 | 23 |
| 20 | 1/5 (0) | 0/5 (0) | 6 (0) | 0/44 | 17 |

جدول 4- خلاصه نتایج تجزیه مدل‌ها به‌منظور انتخاب مدل مناسب برای پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

| منبع | درجه آزادی | دانسیته کف ($gr/cm^3$) | | | | حجم زهکشی (ml) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | مجموع مربعات | میانگین مربعات | اندیس F | احتمال F | مجموع مربعات | میانگین مربعات | اندیس F | احتمال F |
| میانگین | 1 | 4/01 | 4/01 | --- | --- | 3744/22 | 3744/22 | --- | --- |
| خطی | 3 | 0/056 | 0/019 | 3/35 | 0/0456 | 413/69 | 137/90 | 20/88 | <0/0001 |
| 2FI | 3 | 0/057 | 0/019 | 7/69 | 0/0033 | 14/50 | 4/83 | 0/69 | 0/5746 |
| **چند جمله‌ای** | 3 | 0/018 | $5/957\times10^{-3}$ | 4/11 | 0/0386 | 49/66 | 16/55 | 3/99 | 0/0417 |
| مکعبی | 4 | $7/780\times10^{-3}$ | $1/945\times10^{-3}$ | 1/74 | 0/2596 | 14/05 | 3/51 | 0/77 | 0/5835 |
| باقیمانده | 6 | $6/717\times10^{-3}$ | $1/120\times10^{-3}$ | --- | --- | 27/46 | 4/58 | --- | --- |
| کل | 20 | 4/15 | 0/21 | --- | --- | 4263/57 | 213/18 | --- | --- |
| آزمون ضعف برازش | | | | | | | | | |
| خطی | 11 | 0/087 | $7/934\times10^{-3}$ | 15/66 | 0/0035 | 83/84 | 7/62 | 1/75 | 0/2800 |
| 2FI | 8 | 0/030 | $3/729\times10^{-3}$ | 7/36 | 0/0208 | 69/34 | 8/67 | 1/98 | 0/2335 |
| چند جمله‌ای | 5 | 0/012 | $2/393\times10^{-3}$ | 4/72 | 0/0568 | 19/68 | 3/94 | 0/90 | 0/5440 |
| مکعبی | 1 | $4/184\times10^{-3}$ | $4/184\times10^{-4}$ | 8/26 | 0/0348 | 5/63 | 5/63 | 1/29 | 0/3077 |
| خطا | 5 | $2/533\times10^{-3}$ | $5/067\times10^{-4}$ | --- | --- | 21/83 | 4/37 | --- | --- |

با توجه به عدم معنی‌داری آزمون ضعف برازش در مدل چند جمله‌ای پیشنهادی برای پاسخ‌ها (جدول 4) و نیز بالا بودن مقدار ضریب تعیین (جدول 5) می‌توان بیان کرد که این مدل قدرت بالایی در برازش داده‌های آزمون دارد.

**جدول 5- نتایج آماری مدل چند جمله‌ای درجه دوم بر داده‌های پاسخ**

| پاسخ | میانگین | انحراف معیار (SD) | ضریب تغییرات (CV) | $R^2$ | $R^2_{adjusted}$ | $R^2_{predicted}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| دانسیته | 0/45 | 0/038 | 8/51 | 0/9008 | 0/8116 | 0/2835 |
| حجم زهکشی | 13/68 | 2/04 | 14/89 | 0/9201 | 0/8481 | 0/6306 |

لازم به ذکر است که در مورد حجم زهکشی کف، دو مدل خطی و چند جمله‌ای پیشنهاد شده است. اما به دلیل بالاتر بودن مقادیر $R^2$ در مدل چندجمله‌ای نسبت به مدل خطی، مدل چندجمله‌ای برای حجم زهکشی در نظر گرفته شد.

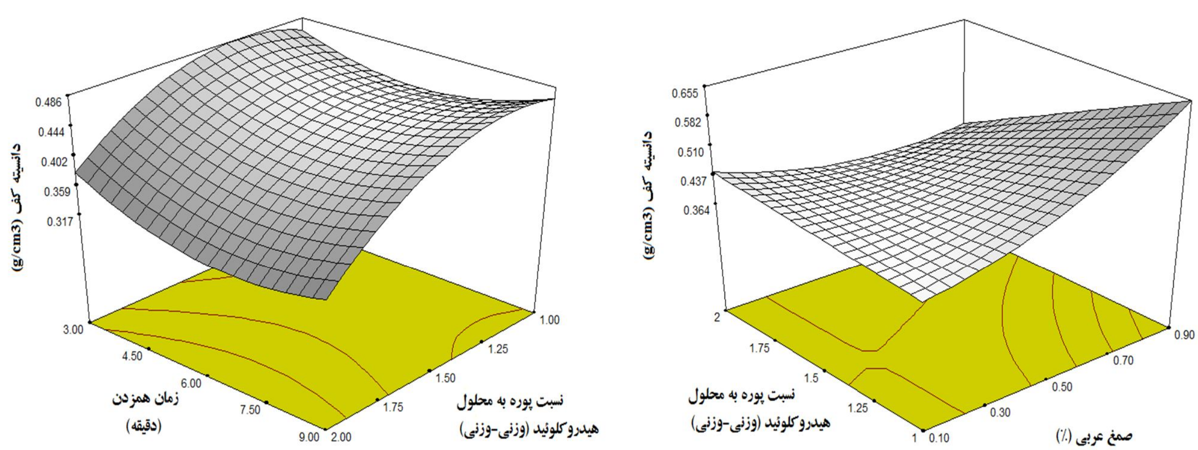
### تأثیر متغیّرهای مستقل بر پاسخ‌ها

#### دانسیته کف

یکی از پارامترهای مهم در سیستم‌های کفی مقدار دانسیته است. مقدار بالای هوای محبوس شده طی همزدن منجر به انبساط کف می‌شود که نشان دهنده قابلیت کف‌زایی است. نتایج نشان داد که درصد صمغ عربی و نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید به‌صورت خطی اثر معنی داری روی دانسیته کف داشتند ($p<0/01$). همچنین اثر درجه دوم درصد صمغ ($p<0/05$) و نیز اثر متقابل درصد صمغ- نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید نیز معنادار بود ($p<0/01$). اما زمان همزدن اثر معناداری روی دانسیته کف نداشت ($p>0/05$). با قرار دادن مدل چندجمله‌ای درجه دوم در معرض الگوریتم حذف پسخور، مدل تجربی نهایی در قالب فاکتورهای کدگذاری شده که اثر معنی‌داری روی دانسیته کف داشتند به‌صورت معادله زیر ارائه شد:

$$FD = 0.295 + 0.091X_1 + 0.463X_2 + 0.269X_2^2 - 0.406X_1X_2 \quad (13)$$

و زمان همزدن به‌صورت سه‌بعدی در شکل 1، نشان داده شده است.




ب الف

**شکل 1- نمودار سطح پاسخ دانسیته کف: الف) تاثیر نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید و درصد صمغ عربی. ب) تاثیر نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید و زمان همزدن**

همانطور که مشاهده می‌شود در سطوح پایین نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید، با افزایش غلظت صمغ، میزان دانسیته کف افزایش پیدا کرده است. . هنگامی که صمغ به یک مایع اضافه می‌شود، سبب افزایش ویسکوزیته آن می‌گردد. این افزایش ویسکوزیته مانع از ورود هوا شده، حداکثر میزان هوای محبوس شده در مخلوط را کاهش می‌دهد، از این رو موجب کاهش انبساط و در

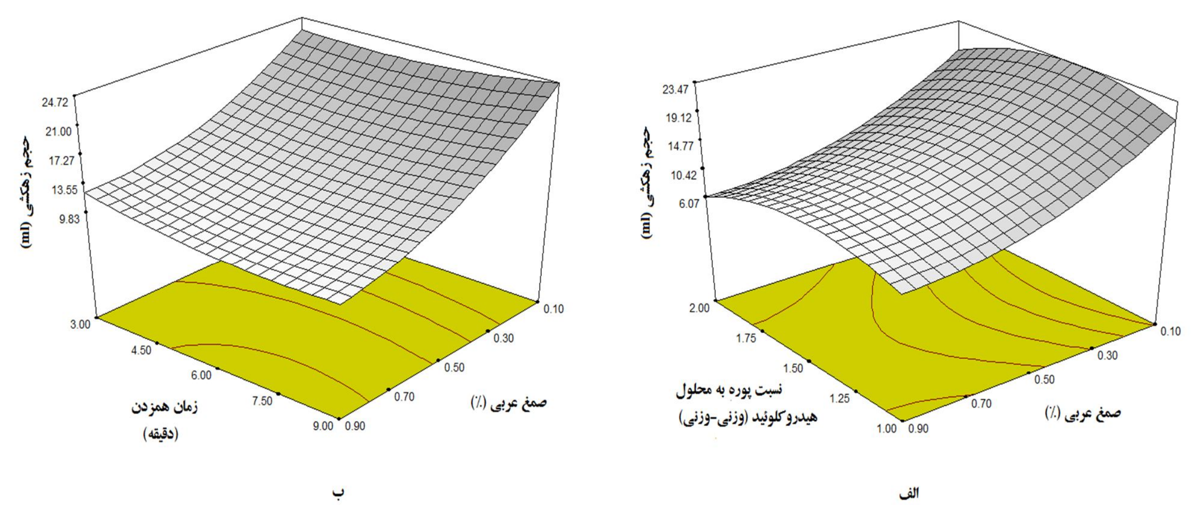
نتیجه افزایش دانسیته کف می‌شود (Bikerman, 1973). مشابه این نتایج توسط Bag و همکاران (2011)، عزیزپور (1391)، حسن‌زاده راد (1393) و صلاحی (1394) به‌ترتیب برای تولید کف پالپ میوه Bael، میگو، ماهی کیلکا و پالپ طالبی گزارش شده است. همچنین، در غلظت‌های بالای صمغ عربی، افزایش نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید، دانسیته کف را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است، این در حالی است که در سطوح پایین غلظت صمغ عربی، افزایش یا کاهش نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید تاثیر چشمگیری بر دانسیته کف نشان نمی‌دهد. Laneuvile و همکاران (2000) اظهار داشتند که ترکیبات پلی‌ساکاریدی نظیر صمغ‌ها از طریق افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته، کاهش برهمکنش‌های پروتئین– پروتئین و حفظ گروه‌های باردار، تجمع و رسوب پروتئین‌ها را کاهش و عملکرد آن‌ها را در سیستم‌های کفی افزایش می‌دهند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید از 1:1 تا 1: 1/25، میزان دانسیته کف افزایش پیدا می‌کند. مشابه این نتایج برای خشک کردن کف پوشی پنیر گزارش شده است (ایزدی، 1393). اما بعد از آن با افزایش نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید از 1: 1/25 تا 2:1 ، میزان دانسیته کف کاهش پیدا کرده است که دلیل این امر می‌تواند مربوط به تغییرات ایجاد شده در ویسکوزیته نمونه‌ها باشد. ویسکوزیته مایع نقش مهمی در میزان دانسیته دارد و حد معینی از ویسکوزیته برای ایجاد مقدار دانسیته مناسب مورد نیاز است (Baer *et al*., 1997). همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، در نسبت‌های مختلف نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید، تغییر زمان همزدن اثر معناداری بر دانسیته کف نداشت.

**پایداری کف**

تعیین پایداری کف یک مرحله کلیدی و مهم در مطالعه خواص کف می‌باشد که معمولاً با اندازه‌گیری میزان مایع جدا شده (زهکشی) از کف طی مدت زمان مشخص تعیین می‌شود. پایداری کف به‌وسیله خواص فیزیکی و رئولوژیکی در فصل مشترک هوا- مایع و فاز پیوسته تحت تاثیر قرار می‌گیرد. خصوصیات فصل مشترک، توزیع اندازه حباب‌های کف، نفوذپذیری سطح مشترک و کشش سطحی بر میزان حجم زهکشی موثر هستند. جریان مایع از میان ساختار کف ناشی از نیروهای موئینگی یا نیروهای خارجی نظیر نیروی ثقل می‌باشد که در نتیجه نازک شدن و از هم گسیختگی دیواره حباب رخ می‌دهد (Muthukumaran, 2007). نتایج نشان داد که نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید و صمغ عربی ($p<0/01$) به‌صورت خطی اثر معنی‌داری روی پایداری کف داشتند. همچنین اثر درجه دوم نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید و صمغ عربی ($p<0/01$) نیز معنی‌دار بود. اما زمان همزدن، همانند دانسیته کف، اثر معناداری بر پایداری کف نداشت ($p>0/05$). با قرار دادن مدل چند جمله‌ای درجه دوم در معرض الگوریتم حذف پسخور، مدل تجربی نهایی در قالب فاکتورهای کدگذاری شده که اثر معنی‌داری روی پایداری کف داشتند به‌صورت معادله زیر ارائه شد:

$$V = -2.961 + 41.61X_1 - 35.347X_2 - 14.537X_1^2 + 19.473X_2^2 \quad (14)$$

که در این رابطه $X_1$ نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید (w/w) و $X_2$ غلظت صمغ عربی (g/100g) هستند. تغییر دانسیته کف پوره سیب‌زمینی با نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید، درصد صمغ عربی و زمان همزدن به‌صورت سه‌بعدی در شکل 2، نشان داده شده است.




**شکل 2- نمودار سطح پاسخ پایداری کف: الف) تاثیر نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید و درصد صمغ عربی. ب) تاثیر درصد صمغ عربی و زمان همزدن**

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود صمغ عربی نقش اساسی و مهم در پایداری کف دارد. افزایش میزان صمغ سبب افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و خاصیت ویسکوالاستیکی و ارتجاعی لاملا[1] می‌شود که در این حالت مقاومت دیواره حباب بیشتر شده، منجر به افزایش استحکام ساختار کف و ممانعت از فروپاشی حباب‌ها می‌شود (Papalamprou *et al*., 2005). Prins (1988) بیان کرد که افزایش ویسکوزیته فاز مایع سبب ایجاد ساختار شبکه‌ای در فاز پیوسته شده به‌طوری که دیواره فصل مشترک را از شکسته شدن حفظ می‌کند و باعث بهبود پایداری کف می‌شود. نتایج مشابه‌ای توسط Bag و همکاران (2011)، عزیزپور (1391)، پاسبان (1391)، عطاردی (1393)، حسن‌زاده راد (1393) و صلاحی (1394) به‌ترتیب در بررسی پایداری کف‌های پالپ میوه Bael، میگو، قارچ دکمه‌ای، ریزجلبک اسپیرولینا، ماهی کیلکا و پالپ طالبی گزارش شده است. همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید از 1: 1/5 تا 2:1، حجم مایع جدا شده از کف کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده افزایش پایداری کف است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش ویسکوزیته و غلیظ‌تر شدن اجزاء مخلوط مورد نظر نسبت داد. Karim و Wai (1999)، Raharitsifa و همکاران (2006)، Bag و همکاران(2011)، عزیزپور (1391) و ایزدی (1393) به‌ترتیب در بررسی ویژگی‌های کف تهیه شده از پالپ میوه Star، آب سیب، پالپ میوه Bael، میگو و پنیر به نتایج مشابه‌ای دست یافتند. Falade و همکاران (2003) گزارش دادند که با افزایش محتوی جامد کل ماده غذایی، پایداری کف افزایش می‌یابد که در مقابل موجب کاهش حجم زهکشی می‌شود. همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، در غلظت‌های مختلف صمغ عربی، تغییر زمان همزدن اثر معناداری بر دانسیته کف نداشت. نتایج مشابه ای توسط عزیزپور (1391) برای بهینه‌سازی تولید کف میگو گزارش شده است.

### تعیین شرایط بهینه تولید کف

به‌منظور تولید کف مطلوب از نظر دانسیته و حجم زهکشی از کف، سطوح بهینه نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید، غلظت صمغ عربی و زمان همزدن با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی نرم‌افزار Design expert تعیین گردید. در این پژوهش، هدف از بهینه‌سازی، تولید کف پوره سیب‌زمینی با حداقل میزان دانسیته و حجم زهکشی بود. بر این اساس شرایط بهینه جهت تولید کف با کمترین میزان دانسیته و کمترین میزان حجم زهکشی در نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید 2:1، غلظت صمغ 0/77 درصد و زمان همزدن 6/8 دقیقه تعیین شد. تحت این شرایط بهینه، مقادیر دانسیته و حجم زهکشی اندازه‌گیری شده به‌ترتیب 0/30 گرم بر سانتی‌متر مکعب و 5 میلی‌لیتر بود. Hart و همکاران (1963) بیان کردند که دانسیته کف در محدوده 0/6– 0/2 گرم بر سانتی‌متر مکعب برای خشک کردن کف‌پوشی مناسب می‌باشد.

### ارزیابی فرایند خشک شدن کف

### بررسی منحنی‌های خشک شدن

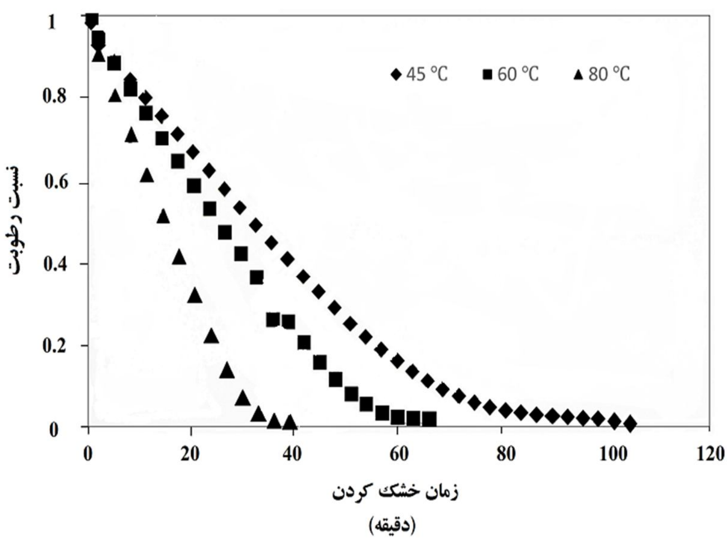
منحنی خشک شدن کف پوره سیب‌زمینی در دماهای 450، 60 و 80 درجه سانتی‌گراد در شکل 3 آورده شده است.

با افزایش دمای خشک کردن زمان خشک شدن نمونه‌های کف کاهش پیدا کرده است به‌طوریکه با افزایش دما از 45 به 80 درجه سانتی‌گراد، مدت زمان خشک شدن کمتر از یک سوم شده است. دلیل این امر افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت از نمونه کف با افزایش دمای خشک کردن است. ارزیابی محتوای رطوبتی در زمان، اولین نشانه از چگونگی انجام فرایند خشک کردن می‌باشد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار جهت مقایسه رفتار خشک شدن مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. سرعت خشک شدن که به‌عنوان تابعی از زمان یا محتوای رطوبتی بیان می‌شود، پارامتر بسیار مهمی است که به درک ویژگی‌های خشک شدن یک ماده کمک می‌کند (صلاحی، 1394).

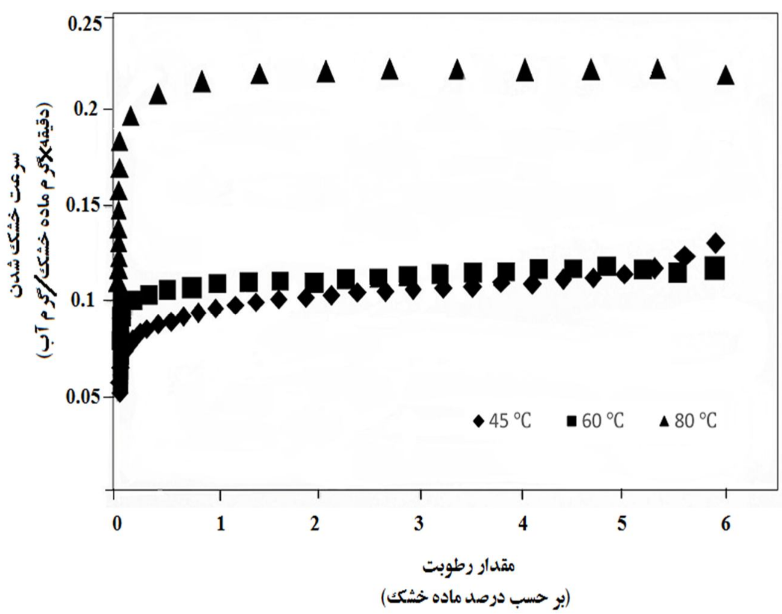
سرعت خشک شدن (شدت افت رطوبت) به‌عنوان تابعی از محتوای رطوبتی، در دماهای مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. بیشترین سرعت خشک شدن در بالاترین دما خشک کردن مشاهده شد. این شکل نشان می‌دهد که سرعت خشک شدن کف پوره سیب‌زمینی در مراحل اولیه خشک شدن در مقایسه با مراحل نهایی بالاتر است. دو مرحله را می‌توان برای خشک شدن کف‌ها در نظر گرفت. در مرحله اول، به دلیل بالا بودن میزان رطوبت در سطح کف بالاترین نرخ خشک شدن در ابتدای خشک شدن ثبت شده است. در این مرحله سرعت خشک شدن ثابت است. در پایان مرحله اول خشک شدن، تمام آب آزاد موجود تبخیر می‌شود و این وضعیت با کاهش ناگهانی در سرعت خشک شدن همراه است. پس از رسیدن به مقدار رطوبت بحرانی دوره سرعت نزولی آغاز می‌شود. مرحله دوم خشک شدن نشان‌دهنده آن است که یک مقاومت در برابر انتقال جرم درونی سبب کنترل حذف رطوبت می‌شود و نفوذ رطوبت در این حالت بستگی به ساختار خلل و فرج و واکنش‌های بین رطوبت و ساختار کف دارد (Okos *et al*., 1992). در این مرحله، نفوذ آب پیوندی مکانیسم اصلی کنترل‌کننده تبخیر رطوبت می‌باشد. محتوای رطوبتی متناظر با آب باند شده در مواد غذایی از جمله میوه‌ها بسته به نوع آن حدود 0/21-0/11 کیلوگرم آب بر حسب ماده خشک می‌باشد (Lim *et al*., 1995). روند مشابه‌ای برای خشک کردن کف‌پوشی میگو (عزیزپور، 1391) و پالپ طالبی (صلاحی، 1394) گزارش شده است

---

1 Lamella




**شکل 3-** تغییرات نسبت رطوبت با زمان خشک کردن کف بهینه شده در دماهای مختلف




**شکل 4-** تغییرات سرعت خشک شدن با محتوی رطوبتی کف بهینه شده در دماهای مختلف

## مدل‌سازی کینتیک خشک کردن

مدل‌های مختلف توسط چهار معیار ضریب همبستگی، مربع کای، ریشه میانگین مربعات خطا و مجموع مربعات خطا با یکدیگر مقایسه و در نهایت مدلی انتخاب گردید که دارای بیشترین مقدار $R^2$ وکمترین مقدار $\chi^2$، RMSE و SSE باشد. با توجه به معیارهای بیان شده برای انتخاب بهترین مدل، در تمامی دماهای خشک شدن کف بهینه، مدل ویبل دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بود. مشابه این نتایج برای خشک کردن کف‌پوشی پالپ طالبی (صلاحی، 1394) و ماهی کیلکا (حسن‌زاده راد، 1393) گزارش شده است. پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل ویبل به‌دست آمده در دماهای مختلف خشک شدن در جدول 6 گزارش شده است.

جدول 6- نتایج آماری و پارامترهای ثابت حاصل از برازش داده‌های آزمایش با مدل ویبل در شرایط مختلف خشک کردن

| دما (°C) | $a$ | $b$ | $k$ | $n$ | $R^2$ | $\chi^2$ | RMSE | SSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 45 | -0/0157 | -0/9598 | 0/0027 | 1/582 | 0/997 | 0/00026 | 0/0160 | 0/00976 |
| 60 | -0/0054 | -0/1236 | 1/0980 | 1/452 | 0/997 | 0/00035 | 0/0186 | 0/00657 |
| 80 | -0/0647 | -1/035 | 0/0081 | 1/598 | 0/996 | 0/00056 | 0/0237 | 0/00619 |

**محاسبه ضریب نفوذ موثر و انرژی فعّال سازی**

مقادیر ضریب نفوذ موثر حین خشک کردن کف بهینـه شـده در جدول 7 ذکر شده است.

همانگونه که در این جدول ملاحظه می‌شود بـا افـزایش دمـا در فرایند خشک شدن کف، ضریب نفوذ موثر رطوبت یک روند افزایشی دارد و مقدار آن در بازه دمایی 45 تا 80 درجه سانتی‌گراد در محدوده $3/286\times10^{-9}$ تا $8/032\times10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه می‌باشد. دلیل وقوع این مسئله تاثیر بارز دما در ایجاد جنبش ملکـولی و مکـش سـطحی بیشتر و افزایش ضریب مـذکور مـی‌باشـد (عزیزپـور، 1391). نتـایج مشابه‌ای برای خشک کردن کف‌پوشی مواد غذایی مختلفـی گـزارش شده است. به‌عنوان مثال، برای انبه ضـریب نفـوذ رطوبـت در حالـت غیرکفی و کفی در دمای 60 درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب $5/3\times10^{-9}$ و $9/7\times10^{-9}$ متر مربع بـر ثانیـه بـه‌دسـت آمـد (Rajkumar *et al*., 2007)، یا برای موز در محدوده دمایی 60 تا 80 درجه سانتی‌گـراد و دانسیته 0/3 تا 0/7 گرم بر سانتی‌متر مکعب، ضریب نفوذ رطوبت بین $1/02\times10^{-9}$ تا $3/6\times10^{-9}$ متر مربع بـر ثانیـه گـزارش شـده اسـت (Thuwapanichayanan *et al*., 2008). در مورد آب گوجه‌فرنگـی در دامنه دمایی 60 تا 70 درجه سانتی‌گراد، ضریب نفوذ موثر رطوبت در محدوده $2/026\times10^{-8}$ تا $3/039\times10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه به‌دست آمد (Kadam & Balasubramanuan, 2011). مقدار ضـریب نفـوذ موثر رطوبت در مورد خشک کردن کف‌پوشی پالپ طالبی نیز در بازه دمایی 40 تا 70 درجه سانتی‌گراد و در ضخامت‌هـای 3 و میلـی‌متـر به‌ترتیب در محدوده $3/283\times10^{-9}$ تا $9/483\times10^{-9}$ و $4/053\times10^{-9}$ تا $1/216\times10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه قرار داشت (صلاحی، 1394).

مقدار انرژی فعّال‌سازی از روی نمودار تغییرات $\ln\ D_{eff}$ در برابـر عکس دما مطلق به‌دست آمد. انرژی فعّال‌سازی برای خشک کـردن کف‌پوشی پوره سیب‌زمینی 30/97 کیلوژول بـر مـول محاسـبه شـد. مشابه این مقادیر برای خشک کردن کف‌پوشی موز در دانسیته‌هـای 0/3 ، 0/5 و 0/7گرم بر سانتی‌متر مکعب (به‌ترتیب برابـر بـا 21/08، 22/9 و 25/19 کیلو ژول بر مول) (Thuwapanichayanan *et al*., 2008)، برای انبه پیش تیمار شده با اسمز و خشـک شـده بـه روش کف‌پوشـی (22/3 کیلـو ژول بـر مـول) (Alakali *et al*., 2010) و خشک کردن کف‌پوشی پالپ طالبی برای بازه دمای 40 تا 70 درجـه سانتی‌گراد و ضخامت 3 و 5 میلی‌متر (به‌ترتیـب 31/714 و 33/043 کیلوژول بر مول) (صلاحی، 1394) گزارش شده است.

جدول 7- مقادیر ضریب نفوذ موثر و انرژی فعّال‌سازی کف پوره سیب‌زمینی در تیمارهای آزمایش

| دما (°C) | $R^2$ | ضریب نفوذ موثر آب ($m^2/s$) | $E_a$ (kJ/mol) | $D_0$ ($m^2/s$) |
|---|---|---|---|---|
| 45 | 0/963 | $3/286\times10^{-9}$ | 30/97 | $3/74\times10^{-4}$ |
| 60 | 0/902 | $4/381\times10^{-9}$ | | |
| 80 | 0/933 | $8/032\times10^{-9}$ | | |

**بررسی ویژگی‌های پودر**

**فعّالیت آبی**

فعّالیت آبی معیاری از آب آزاد موجود در مواد غـذایی اسـت کـه مسئول واکنش‌های بیوشیمیایی بوده و شاخص مهمی در تعیین ثبات میکروبی مواد غذایی است و برابر با نسبت فشار بخار آب ماده غذایی در دمای معین به فشار بخار آب خالص در همان دما است (Deman, 1999). فعّالیت آبی وابسته به دما است. تغییر دما به علت تغییر در آب متصل، گسستگی آب و حلالیت مواد حل شده در آن موجب تغییر در فعّالیت آبی می‌شود (Jangam *et al*., 2010).

مقادیر فعّالیت آبی پودرهای سیب زمینی در محـدوده 0/096 تـا 0/152 قرار دارد (جدول 8).

نتایج نشان داد که با افزایش دما مقدار فعّالیت آبـی نمونـه‌هـای پودر به‌طور معناداری کـاهش پیـدا کـرده اسـت ($P<0/05$). کـاهش فعّالیت آبی با افزایش دما را از طرفی می‌توان به دلیل کاهش رطوبت نمونه‌ها در دماهای بالاتر دانست. زیرا ساختار متخلخل‌تر است و این امر کاهش رطوبت در دماهای بالاتر را تسریع می‌کند. از سوی دیگـر با افزایش دما به دلیل باز شدن و تغییر سـاختار پـروتئین‌هـا توانـایی نگهداری آب باند شده آنها کاهش می‌یابد که خود بر کاهش فعّالیت

آبی پودر تاثیرگذار است (عزیزپور، 1391). مواد غذایی که میزان فعّالیت آبی آنها کمتر از 0/6 است از نظر میکروبی پایدار هستند (Solval *et al.*, 2012). مقادیر فعّالیت آبی پودرها در این مطالعه کمتر از 0/2 بود، لذا، می‌توان پودرها را از نظر میکروبی طی نگهداری پایدار دانست. مقادیر فعّالیت آبی گزارش شده برای خشک کردن کف پوشی میگو (عزیزپور، 1391) در بازه دمایی 45 تا 90 درجه سانتی‌گراد، خشک کردن کف‌پوشی ریز جلبک *اسپیرولینا پلاتنسیس* (عطاردی، 1393) در بازه دمایی 40 تا 70 درجه سانتی‌گراد و برای خشک کردن کف‌پوشی پالپ طالبی (صلاحی، 1394) در بازه دمایی 40 تا 70 درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب در محدوده 0/251 -0/126، 0/235 –0/143 و 0/288 – 0/147 گزارش شده است.

جدول 8- مقادیر فعّالیت آبی و قابلیت جذب آب پودر پوره سیب‌زمینی در تیمارهای آزمایش

| دما (°C) | فعّالیت آبی ($a_w$) | قابلیت جذب آب (%) |
|---|---|---|
| 45 | 0/152[a] | 275/57[a] |
| 60 | 0/124[ab] | 273/70[a] |
| 80 | 0/096[b] | 274/58[a] |

### قابلیت جذب آب

قابلیت جذب آب عمدتاً به ترکیب شیمیایی پودر نظیر میزان پروتئین، رطوبت و کربوهیدرات‌ها، حالت فیزیکی آن نظیر شکل و اندازه ذرات، خواص سطحی، ریز ساختار و وجود مواد افزودنی بستگی دارد (صلاحی، 1394). قابلیت جذب آب پودر سیب‌زمینی در بازه 273/70 تا 275/57 درصد قرار دارد (جدول 8)، که نشان‌دهنده آن است که پودرهای تولیدی به روش خشک کردن کف‌پوشی از قابلیت جذب آب بالایی برخوردار هستند. اختلاف معناداری در قابلیت جذب آب پودرها مشاهده نمی شود (P>0/05). مقادیر مشابه‌ای برای پودرهای میگو تهیه شده به روش خشک کردن کف‌پوشی در بازه دمایی 45 تا 90 درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (327/99-269/5 درصد).

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش شرایط تولید کف پوره سیب‌زمینی جهت خشک کردن به روش کف‌پوشی با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه‌سازی شد. در ادامه تأثیر دماهای مختلف خشک کردن بر میزان ضریب نفوذ موثر آب، انرژی فعّال‌سازی، مدل‌سازی کینتیک خشک‌کردن کف بهینه‌سازی شده و نیز ویژگی‌های کیفی پودر (فعّالیت آبی و ظرفیت جذب آب) بررسی گردید. شرایط بهینه جهت تولید کف پوره سیب‌زمینی با کمترین میزان دانسیته و کمترین میزان حجم زهکشی در نسبت پوره به محلول هیدروکلوئید 2:1، غلظت صمغ عربی 0/77 درصد و زمان همزدن 6/8 دقیقه تعیین شد. ارزیابی منحنی‌های خشک شدن نشان داد که کف بهینه شده دارای دو مرحله سرعت خشک شدن ثابت و سرعت خشک شدن نزولی است به‌طوریکه بخش اعظم رطوبت در مرحله سرعت ثابت خشک شدن از ساختار کف خارج می‌شود. آنالیزهای آماری نشان داد که در تمامی فرایندهای خشک کردن مدل ویبل بهترین انطباق را با داده‌های تجربی داشت. مقادیر ضریب نفوذ موثر در بازه دمایی مورد مطالعه در محدوده $3/286\times10^{-9}$ تا $8/032\times10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه با میزان انرژی فعّال‌سازی 30/97 کیلوژول بر مول قرار داشت. همچنین، نتایج حاصل از آنالیز پودرها نشان داد که با افزایش دما از 45 تا 80 درجه سانتی‌گراد مقدار فعّالیت آبی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است، در حالی که میزان ظرفیت جذب آب پودرها تحت تاثیر دمای خشک کردن قرار نگرفته است. خشک کردن کف بهینه شده در دمای 80 درجه سانتی‌گراد سبب کاهش زمان خشک شدن و در نتیجه مصرف کمتر انرژی برای تولید پودر پوره سیب‌زمینی با پایداری بالا (مقدار فعّالیت آبی پایین) و قابلیت جذب آب بالا می‌شود.

## منابع


Akpinar, E. K., 2006, Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73, 75–84.

Akpinar, E., Midilii, A. & Bicer, Y., 2003, Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Convection and Management*, 44, 1689-1705.

Alakali, J. S., Kucha, E. I. & Ariahu, C. C., 2010, drying characteristics of osmo-foam-mat mango pulp. *Journal of agriculture, Biotechnology & Ecology*, 3(1), 87-98.

Anonymous, 2011, *Food Agriculture Organization of the United Nations*. Official Methods of Analysis, Arlington.

Atarodi, M. R, 2014, Optimization of process parameters for spirulina platensis foam-mat drying. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Azizpour, M, 2012, Optimization of process parameters in foaming and evaluation of mass transfer kinetics in foam mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Baer, R. J., Wolkow, M. D. & Kasperson, K. M., 1997, Effect of emulsifiers on the body and texture of low fat ice cream. *Journal of Dairy Science*, 80, 3123–3132.

Bag, S. K., Srivastav, P. P. & Mishra, H. N., 2011, Optimization of process parameters for foaming of Bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. *Food and Bioprocess Technology*, 4 (8), 1450-1458.

Bikerman, J. J., 1973, *Foams*. New York, USA: Springer-Verlag.

Brygidyr, A. M., Rzepecka, M. A. & McConnell, M. B., 1977, Characterization and drying of tomato paste foam by hot air and microwave energy. *Journal Canadian Institute of Food Science and Technology*, 10, 313–319.

Crank, J, 1975, *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, London.

Deman, J. M., 1999, *Principles of food chemistry*. 3rd ed. Springer. New York.

Dunkwal, V., Jood, S. & Singh, S., 2007, Physic chemical properties and sensory evaluation of pleurotus sajor caju powder as influenced by parameters and drying methods. *British Food Journal*, 109(9), 749-759.

Duran, M., Pedreschi, F., Moyano, P. & Troncoso, E., 2007, Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 257-265.

Falade, K. O., Adeyanju, K. I. & Uzo-Peters, P. I., 2003, Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glycerylmonostearate and egg albumin as foaming agents. *European Food Research Technology*, 217(6), 486-491.

Hart, M. R., Graham, R. P., Ginnette, L. F. & Morgan, A. I., 1963, Foams for foam-mat drying. Food Technology, 17(10), 90-92.

Hasanzadeh rad, F, 2014, Optimization of process parameters in foaming and evaluation of mass transfer kinetics in foam mat drying of Kilka fish. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Hooker, W. J., 1983, *Compendium of potato diseases*. American Phytopathological Society, St. Paul, USA.

Izadi, T, 2014, Survey on WPC (Whey Protein Concentrate) function in formation and stability of cheese foam and optimization of cheese powder production using foam mat drying. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Jafarian, S., 2000, Effect of pre-heating and use of some of hydrocolloids in reduction oil uptake and quality of potato French fries. MSc thesis. Isfahan University.

Jangam, S. V., Law, C. L. & Mujumdar, A. S., 2010, *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. 1st ed. Singapore.

Kadam, D. M. & Balasubramanuan, S., 2011, Foam-mat drying of tomato juice. *Food Processing and Preservation*, 35 (4), 488-495.

Kadam, D. M., Patil, R. T. & Kaushik, P., 2010, Foam mat drying of fruit and vegetable products, in drying of foods, vegetables and fruits - Volume (1), Ed. Jangam, S.V., Law, C.L., and Mujumdar, A.S. Published in Singapore, pp, 111-124.

Karim, A. A. & Wai, C. C., 1999. Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. *Food Hydrocolloids*, 13, 203-210.

Kaur, S., Sarkar, B. C., Sharam, H. K. & Singh, C., 2009, Optimization of enzymatic hydrolysis pretreatment conditions for enhanced juice recovery from guava fruit using response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 2, 96–100.

Laneuvile, S. L., Papuin, P. & Turgen, S. L., 2000, Effect of preparation conditions on the characteristic of whey protein- xanthan gum complex. *Journal of food hydrocolloids*, 14, 305-314.

Lim, L. T., Tang, J. & He, J., 1995, Moisture sorption characteristics of freeze dried blueberries. *Journal of Food Science*, 60, 810–814.

Lisinska, G. & Leszczynski, W., 1989, *Potato science and technology*, Elsevier science publishers. pp, 166-227.

Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A. & Virseda, P., 2000, Thin-layer drying behaviour of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology*, 18, 995–1006.

Muthukumaran, A, 2007, Foam-mat freeze drying of egg white and mathematical modeling. MSc Thesis. McGill University.

Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K. & Weitnauer, A. C., 1992, *Food dehydration*. In: Heldmann, D.R., Lund, D.B. (Eds.), Handbook of food engineering (pp. 437–562). Marcel Dekker, New York, pp. 437–562.

Papalamprou, E. M., Makri, E. A., Kiosseoglou, V. D. & Doxastakis, G. I., 2005, Effect of medium molecular weight xanthan gum in rheology and stability of oil in-water emulsion stabilized with legume proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(12), 1967-1973.

Paseban, A, 2012, Optimization of process parameters for foam mat drying of mushroom (*Agaricus bisporus* ) puree. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Prins, A., 1988, *Principles of Foam Stability*. Advances in food emulsions and foams. In: E. Dickinson and G. Stainsby (Eds), Elsevier Applied Science. Barking, UK, 91-122.

Raharitsifa, N., Genovese, D. B. & Ratti, C., 2006, Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of Food Science*, 71(3), 142–151.

Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G. S. V. & Ratti, C., 2007, Foam mat drying of alphonso mango pulp. *Drying Technology*, 25 (2), 357 – 365.

Ratti, C. & Kudra, T., 2006, Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. *Drying Technology*. 24: 1101–1108.

Salahi, M. R, 2015, Foam mat drying of cantaloupe (*Cucumis melo*) pulp: Optimization of foaming conditions and investigation of powder properties. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Solval, K. M., Sundararajan, S., Alfaro, L. & Sathivel, S., 2012, Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) juice powders using spray drying technology. LWT - *Food Science and Technology*, 46, 287-293.

Thuwapanichayanan, R., Somkiat, P. & Somchart, S., 2008, Modeling of diffusion with shrinkage and quality investigation of banana foam mat drying. *Journal of Drying Technology*, 26, 1326-1333.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 14, No. 4, Oct- Nov 2018, p.585-600

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 4، مهر- آبان 1397، ص. 600-585

# Optimization of potato puree powder production using foam mat drying method

A. Pourmahdi[1], M. Mohebbi[2*], A. Gohari Ardabil[3], M. Varidi[4], M. R. Salahi[5]

Received: 2016.12.13
Accepted: 2018.01.09

**Introduction:** Potato is one of the most consumed and highly nutritious vegetables with high energy, dietary fiber, phytochemicals, vitamins, and minerals which offer great benefit for utilization as functional food ingredient. The dried potato powder can be used in formulation of many foods like soups, snacks, sauces, noodles, etc. The foam mat drying involves the dehydration of a thin layer of foam followed by its disintegration in order to obtain a powder which can be easily reconstituted in water when added to other foods. Because of the porous structure of the foamed materials, mass transfer is enhanced leading to shorter drying times and consequently acquiring higher quality in the dried product. Food foams can be considered as biphasic systems where a gas (dispersed phase) is embedded in a continuous liquid phase. The foam properties such as structure, density and stability have important influence on moisture migration during drying and accordingly, the quality of final product. Foams that do not collapse for at least 1h are mechanically or thermally stable for the entire drying process. Response surface methodology (RSM) is a combination of mathematical and statistical techniques which used to investigate the interaction effects of independent variables on responses. There is considerable information on foam-mat dried food powders, but there is not any scientific literature that related to study on foam-mat drying of potato puree. The present research was thus focused on optimizing the foaming conditions (potato puree: gum solution ratio; Arabic gum (AG) concentration as the stabilizer and whipping time [WT]) to minimize foam density (FD) and drainage volume (DV) using RSM. Likewise, choosing a suitable model for thin-layer drying of foam and the effect of different drying temperatures (45, 60 and 80°C) on drying behavior were investigated, and the effective moisture diffusivity and activation energy were calculated. The effects of drying temperatures on water activity ($a_w$) and water binding capacity (WBC) were also investigated.

**Material and methods:** Fresh potato was purchased from a local market (Mashhad, Iran). Arabic gum was procured from Sigma Chemical Company (USA). For preparation of potato puree, fresh potatoes were washed and peeled by steel knife and were washed again and additional water was taken absolutely and then crushed by Phillips home crusher (600W) with maximum speed for 3 minutes to get a homogeneous puree. Based on preliminary tests, AG solutions were prepared by dissolving a suitable amount of the selected gum powder in distilled water and stirring with a magnetic stirrer to obtain a uniform solution. This solution was refrigerated at 4°C overnight to complete hydration. RSM was used to estimate the main effects of the process variables on FD and DV in potato puree foam. The experiment was established based on a face-centered central composite design (FCCD). The experimental range was chosen on the basis of the results of preliminary tests. The independent variables were consisted of potato puree: gum solution ratio (1:1 –2:1 w/w), AG concentration (0.1–0.9% w/w) and WT (3–9 min). According to the experimental design, to prepare 100 g of samples, appropriate amount of potato puree and AG solution were mixed in a 250-mL beaker. The mixture was then whipped with a kitchen mixer (model no. SM88, Sonny, China) at a maximum speed of 1,500 rpm at ambient temperature during given time which was recommended by Design-Expert software. The density of foamed potato puree was determined in terms of mass over volume and expressed in g/cm$^3$. In order to assess foam stability, the drainage test was performed for 1h. To evaluate drying behavior of the optimized foam, drying was carried out in a batch-type thin-layer dryer at temperatures of 45, 60 and 80°C on 3 mm thickness. Ten thin-layer drying models were evaluated in the kinetics research. The higher value of $R^2$ and lower values of $\chi^2$, RMSE and SSE were selected

1. Former MSc Student, Islamic Azad University, Mazandaran Science and Research Branch, Iran

2, 4 and 5. Professor, Assistant professor and Ph.D Student, Department of food science & technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

3. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
(Corresponding Author Email: mohebbatm@gmail.com)

as the basis for goodness of fit. Fick's diffusion equation for particles with a slab geometry was used for calculation of effective moisture diffusivity. The foamed potato puree spread on a tray was considered as slab geometry. Activation energy was calculated by a simple Arrhenius-type relationship, by plotting the ln ($D_{eff}$) against the reciprocal of absolute temperature ($1/T$). Furthermore, the effects of drying temperatures on $a_w$ and WBC of powders were investigated.

**Results and discussions:** The quadratic model was selected as a suitable statistic model for both FD and DV. ANOVA showed that this model is significant for both responses. Moreover, lack-of-fit was not significant for response surface models at 95% confidence level, indicating this model is adequately accurate for predicting responses. The optimum values of variables for best product quality in terms of minimum FD and DV corresponded to potato puree to gum solution ratio 2:1(w/w), AG 0.77% (w/w) and WT 6.80 min. The amount of FD and DV for foam at these optimum conditions were 0.30 g/cm$^3$ and 5 ml, respectively.

The result showed that when the drying temperature increased, the drying time decreased. This was due to the quick removal of moisture at higher temperature. Drying rate (DR) versus moisture content of potato puree foam-mats figure showed that DR was higher during the initial stage as compared with the final stage and foam-mat drying was occurred principally in the constant rate period. Due to the increase in surface area and the porous structure, removal of water from the inner surface of potato puree foam to the outer surface was fast enough to preserve the surface moisture. The rate of movement of moisture from the inner surface to the exposed surface decreased with decreasing moisture content, which indicates that the DR decreased and the falling rate period started. The effective moisture diffusivity varied from $3.286\times10^{-9}$ to $8.032\times10^{-9}$ m$^2$/s with activation energy value of 30.97 kJ/mol. Statistical analysis results showed that the Weibull distribution model provide the highest $R^2$ and lowest values of $\chi^2$, RMSE and SSE at all drying temperatures. The temperature elevation reduced $a_w$. This is due to the fact that at higher temperatures, the rate of heat transfer to the sample would increase, therefore, it provides greater driving force for moisture evaporation which results the dried foams with reduced $a_w$. Drying temperatures did not show any significant effect on WBC of powders.

**Keywords**: Potato puree; Foam mat drying; Optimization; Foam properties; Effective moisture diffusion coefficient; Modeling